



TITLE:

低炭素マルテンサイト鋼の水素脆性破壊挙動におよぼす変形条件の影響(Abstract_要旨)

AUTHOR(S):

桃谷, 裕二

CITATION:

桃谷, 裕二. 低炭素マルテンサイト鋼の水素脆性破壊挙動におよぼす変形条件の影響. 京都大学, 2017, 博士(工学)

ISSUE DATE:

2017-03-23

URL:

<https://doi.org/10.14989/doctor.k20362>

RIGHT:

許諾条件により本文は2020-03-22に公開

京都大学	博士（工学）	氏名	桃谷 裕二
論文題目	低炭素マルテンサイト鋼の水素脆性破壊挙動におよぼす変形条件の影響		
(論文内容の要旨)			
<p>本論文は、ラスマルテンサイト組織を有する低炭素鋼（Fe-0.2mass%C 合金）を用い、ひずみ速度や変形温度といった変形条件を系統的に変化させたときの水素脆性破壊挙動を材料組織や水素集積挙動と関連させながら調査・議論した実験研究結果を取りまとめたものであり、5章からなっている。</p>			
<p>第1章は序論であり、本研究の背景と目的を示している。近年、二酸化炭素などの温室効果ガスの排出量削減への社会的要求が強まり、自動車用鋼板などの鉄鋼材料の高強度化が重要な課題となっている。しかし、高強度鉄鋼材料を幅広い用途で使用していく際に大きな問題となるのが「水素脆性」である。水素脆性とは、材料中に水素が侵入することによって強度や延性・靱性などの機械的性質が著しく低下し突然の破壊に至る現象であり、遅れ破壊とも呼ばれている。材料の強度が上昇するにつれて水素脆化感受性が大きく増大することが知られており、高強度鉄鋼材料では通常の大気環境下においても水素脆性が発現する危険性が提唱されている。そのため、水素脆性の抑制が、新たな高強度鉄鋼材料を開発・実用化していく上で避けることのできない重要課題の一つとなっている。これまで水素脆性に関して数多くの研究がなされ、種々の破壊モデルが提唱されてきているが、水素脆性破壊のメカニズムについては未だ統一的な見解が得られていないのが現状である。ほとんどの高強度鉄鋼材料はラスマルテンサイト組織を有する。ラスマルテンサイト組織はラス、ブロック、パケット、旧オーステナイト粒といった大きさの異なる種々の組織単位で構成された複雑な階層組織となっている。材料の機械的性質は材料組織と密接に関連していることが知られており、水素脆性破壊における破壊起点や破壊伝播経路などとラスマルテンサイト組織の相関を正確に把握していくことが、水素脆性破壊のメカニズムを解明していく上で非常に重要である。また、水素脆性破壊挙動はひずみ速度や変形温度などの変形条件に大きく依存することが報告されている。水素脆性破壊の変形条件依存性は材料中の水素の移動・集積挙動と密接に関連していると考えられるが、変形条件によって水素集積挙動がどのように変化するかを実験的に調べた研究報告例はない。本研究は、代表的な高強度鉄鋼材料の一つである低炭素マルテンサイト鋼を対象に、水素脆化感受性と変形条件（ひずみ速度、変形温度）の関係を定量的に評価するとともに、種々の変形条件における水素脆性破壊挙動と材料組織や水素集積挙動の関係を、水素マイクロプリント法と SEM / EBSD 法を組合せた精緻な解析によって明らかにしようとするものである。</p>			
<p>第2章では、陰極電解チャージ法により水素を導入した後、ひずみ速度を系統的に変化させた室温引張試験（ひずみ速度範囲：$\dot{\epsilon} = 8.3 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1} \sim 8.3 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$）を行い、ひずみ速度の低下に伴って延性が大きく低下し、水素脆化感受性が増大することを明らかにしている。また、水素脆性破面には、平滑な粒界破面と筋状模様を伴う粒界破面の2種類が存在することを見出し、ひずみ速度の低下によって特に筋状模様を伴う粒界破面の割合が増加することを明確に示している。さらに、破面やクラックの結晶</p>			

京都大学	博士（工学）	氏名	桃谷 裕二
<p>学的特徴を SEM / EBSD 法により精密に解析し、平滑な粒界破面は旧オーステナイト粒界での粒界破壊に対応しているが、筋状模様を伴う粒界破面は、典型的な粒界破壊とは異なり、旧オーステナイト粒界近傍の $\{011\}$ 面に沿った擬へき開破壊に対応していることを明らかにしている。</p> <p>第 3 章では、室温引張変形中の局所水素分布を水素マイクロプリント法および SEM / EBSD 法により解析し、第 2 章で確認された水素脆化感受性のひずみ速度依存性を水素集積挙動の観点から考察している。変形を負荷しない場合および高ひずみ速度 ($\dot{\epsilon} = 8.3 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$) での引張変形を施した場合、水素は試料中に比較的ランダムに分布しているのに対し、低ひずみ速度 ($\dot{\epsilon} = 8.3 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$) での引張変形によって水素がラス境界、ブロック境界、パケット境界、旧オーステナイト粒界といったラスマルテンサイト組織中の特徴的な境界・粒界上に集積するようになること、特に旧オーステナイト粒界に沿って水素が優先的に集積することを明らかにしている。ひずみ速度の低下に伴って水素脆化感受性が増大し、かつ旧オーステナイト粒界近傍への水素集積が促進されるという結果から、水素脆性破壊は変形中に水素が旧オーステナイト粒界近傍に集積することによって開始すると結論付けている。</p> <p>第 4 章では、変形温度を系統的に変化させた低ひずみ速度引張試験（変形温度範囲：$-100 \text{ }^{\circ}\text{C} \sim 100 \text{ }^{\circ}\text{C}$）を行い、変形温度と水素脆化感受性の相関を調べている。$-100 \text{ }^{\circ}\text{C}$ から室温までの低温度域では変形温度の上昇に伴って水素脆化感受性が増大するが、室温から $100 \text{ }^{\circ}\text{C}$ までの高温度域では水素脆化感受性が低温度域とは逆の変形温度依存性を示し、変形温度の上昇に伴って水素脆性が起こりにくくなることを明らかにしている。変形温度の上昇に伴って水素の拡散・集積が容易に生じるようになるが、室温以上の高温度域では水素の拡散能が非常に高いために、主な集積サイトである旧オーステナイト粒界からの水素脱離も容易に生じるようになる結果、水素脆化感受性が上述のような変形温度依存性を示すものと考察している。</p> <p>第 5 章では、転位運動に伴う水素輸送効果に着目して、焼き戻し熱処理によって種々の初期転位密度 ($\rho = 3.8 \times 10^{14} \text{ m}^{-2} \sim 1.1 \times 10^{15} \text{ m}^{-2}$) を有するラスマルテンサイト組織を作製し、引張変形中の水素集積挙動と転位運動の相関を水素マイクロプリント法および SEM / EBSD 法により調べている。弾性変形域では、初期転位密度の上昇に伴って旧オーステナイト粒界への水素集積が促進されるが、塑性域まで変形して転位を増殖させると、水素集積挙動に初期転位密度の依存性が認められなくなることを見出している。この結果から、変形中の水素集積は転位の水素輸送効果によるものであると結論付けている。そして、2 章および 4 章で確認された水素脆性破壊挙動のひずみ速度依存性および変形温度依存性は、転位運動による水素輸送効果の観点から矛盾なく説明できることを示している。</p> <p>第 6 章は総括であり、本研究で得られた結果を要約している。</p>			

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、ラスマルテンサイト組織を有する低炭素鋼 (Fe-0.2mass%C 合金) を用い、ひずみ速度や変形温度といった変形条件を系統的に変化させたときの水素脆性破壊挙動を材料組織や水素集積挙動と関連させながら調査・議論した研究結果を取りまとめたものであり、得られた主な成果は次の通りである。

1. ひずみ速度および変形温度を変化させた引張試験を行い、水素脆化感受性と変形条件の相関を系統的に明らかにした。また、水素脆性破面には、平滑な粒界破面と筋状模様を伴う粒界破面の2種類が存在することを見出すとともに、SEM / EBSD 法を用いた結晶学的解析によって、平滑な粒界破面は旧オーステナイト粒界での粒界破壊に対応し、筋状模様を伴う粒界破面は、旧オーステナイト粒界近傍の {011} 面に沿った擬へき開破壊に対応していることを明確に示した。

2. 引張変形時の材料中の局所水素分布を水素マイクロプリント法により可視化し、SEM / EBSD 法と組み合わせることによって、変形中に水素がラスマルテンサイト組織中の特徴的な境界・粒界上に集積するようになること、特に旧オーステナイト粒界に沿って水素が優先的に集積することを実験的に証明した。またこの結果を基に、水素脆性破壊は変形中に水素が旧オーステナイト粒界近傍に集積することによって開始することを明らかにした。

3. 初期転位密度の異なるラスマルテンサイト組織の水素集積挙動を水素マイクロプリント法と SEM / EBSD 法により調べ、変形中の旧オーステナイト粒界への水素集積は転位の水素輸送効果によるものであることを明らかにした。さらに、水素脆性破壊挙動のひずみ速度依存性および変形温度依存性は、転位運動による水素輸送効果の観点から矛盾なく説明できることを示した。これらの結果は、マルテンサイト鋼の水素脆性破壊メカニズムを基礎的に議論していく上で重要な成果である。

以上の成果をまとめた本論文は、低炭素マルテンサイト鋼において、変形条件 (ひずみ速度および変形温度) と水素脆化感受性の関係を定量的に評価し、さらに水素脆性破壊挙動と材料組織や水素集積挙動の関係を、水素マイクロプリント法と SEM / EBSD 法を組合せた精緻な解析によって初めて明らかにしたものであり、学術上寄与するところが少なくない。また、本論文で得られた成果は、今後の水素脆性破壊研究における指針的な役割を果たすとともに、耐水素脆性特性に優れた新たな高強度鉄鋼材料の開発・実用化のための材料設計にも有益な情報を与えることが期待される。よって、本論文は博士 (工学) の学位論文として価値あるものと認める。また、平成29年1月20日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行って、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。

なお、本論文は、京都大学学位規程第14条第2項に該当するものと判断し、公表に際しては、(平成32年3月21日までの間) 当該論文の全文に代えてその内容を要約したものとすることを認める。

要旨公開可能日： 平成 29 年 3 月 23 日以降